

EDN: UEWJJI

УДК 621.793.6

Complex Thermal-Chemical Treatments Steps Influence at Diffusion Alloying into Liquid Metal Melt Media Base to Properties of Surface Layers of Carbon Steels Products

Aleksandr G. Sokolov,
Eduard E. Bobylyov* and Popov A. Roman
*Kuban State Technological University
Krasnodar, Russian Federation*

Received 07.11.2022, received in revised form 05.02.2023, accepted 06.04.2023

Abstract. This paper investigated the influence of the complex chemical-thermal treatment technology (CTT) on the properties of the carbon steels surface layers. CTT included carburization, diffusion alloying in the medium of low-melting liquid metal melts (DALMMS) and subsequent heat treatment. Cementation was carried out at a temperature of 950 °C, with an exposure time of 8 hours. DALMMS was carried out in the temperature range from 950 °C to 1050 °C. The duration of exposure varied from 1 hour to 8 hours. DALMMS was carried out in a Pb-Bi medium with the addition of 3–5 % Cr powder. The studies were carried out on samples made of St3, 20X13, 40X, 40X13 steels. It was found that characteristics such as coating thickness and chromium concentration in the surface layer depend on the CTT modes and the steels composition. The maximum thickness of the coatings was observed on steel St3 after CTT at a temperature of 1070 °C, with a duration of 8 hours and was 50 microns. Under the same regime, on steel 20X13 the coating thickness was 37 microns, on steel 40X45 microns, on steel 40X13 30 microns. After carrying out the CTT, the chromium concentration on the surface of samples made of steel St3 is 68,8 %, on steel 40X 64,22 %, on steel 20X13 the chromium content is 62,54 %, on steel 40X13 the chromium content is 64,22 %.

Keywords: steel, diffusion saturation, carburization, liquid metal medium solutions, chromium, coating, thermal chemical treatment.

Citation: Sokolov, A.G., Bobylyov, E.E., Roman, P.A. Complex thermal-chemical treatments steps influence at diffusion alloying into liquid metal melt media base to properties of surface layers of carbon steels products. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2023, 16(3), 341–353. EDN: UEWJJI

Влияние стадий комплексной химико-термической обработки на базе диффузионного легирования в среде легкоплавких жидкометаллических растворов на свойства поверхностных слоев изделий из углеродистых сталей

А. Г. Соколов, Э. Э. Бобылёв, Р. А. Попов
Кубанский государственный университет
Российская Федерация, Краснодар

Аннотация. Статья посвящена исследованию влияния технологии комплексной химико-термической обработки (КХТО) на свойства поверхностных слоев углеродистых сталей. КХТО включала в себя цементацию, диффузионное насыщение в среде легкоплавких жидкометаллических расплавов (ДЛЛЖР) и последующую термическую обработку. Цементация выполнялась при температуре 950 °С, с выдержкой 8 часов. ДЛЛЖР проводилось в диапазоне температур от 950 до 1050 °С. Длительность выдержки варьировалась от 1 до 8 часов. ДЛЛЖР проводилось в среде Рb-Vi с добавлением 3–5 % порошка Ст. Исследования выполнялись на образцах, изготовленных из сталей Ст3, 20Х13, 40Х, 40Х13. Было выявлено, что такие характеристики, как толщина покрытия и концентрация хрома в поверхностном слое, зависят от режимов ДЛЛЖР и состава покрываемой стали. Максимальная толщина покрытий наблюдалась на стали Ст3 после КХТО при температуре 1070 °С, длительностью 8 часов и составляла 50 мкм. При том же режиме на стали 20Х13 толщина покрытия составляла 37 мкм, на стали 40Х – 45 мкм, на стали 40Х13–30 мкм. После проведения КХТО на поверхности образцов из стали Ст3 концентрация хрома составляет 68,8 %, на стали 40Х – 64,22 %, на стали 20Х13 содержание хрома составляет 62,54 %, на стали 40Х13–64,22 %.

Ключевые слова: стали, диффузионное насыщение, хром, цементация, легкоплавкие жидкометаллические расплавы, покрытия, химико-термическая обработка.

Цитирование: Соколов А. Г. Влияние стадий комплексной химико-термической обработки на базе диффузионного легирования в среде легкоплавких жидкометаллических растворов на свойства поверхностных слоев изделий из углеродистых сталей / А. Г. Соколов, Э. Э. Бобылёв, Р. А. Попов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2023, 16(3). С. 341–353. EDN: UEWJJI

Введение

Современный уровень развития науки и техники предъявляет высокие требования к работоспособности конструкционных материалов. Износостойкость, а также коррозионная стойкость, стойкость к хрупкому и усталостному разрушениям во многом определяются механическими и физико-химическими свойствами поверхностных слоев изделий. В связи с этим происходит интенсивное развитие технологий инжиниринга новых функциональных материалов и покрытий. При этом основным конструкционным материалом в настоящее время являются стали различных классов. Создание на их поверхности функциональных покрытий позволяет придать сталям необходимые физико-химические характеристики исходя из условий их эксплуатации, при этом отказаться от дорогостоящих высоколегированных сталей. В связи с этим в настоящий

момент интенсивное развитие получили технологии формирования функциональных покрытий на поверхности стальных изделий. Технологиями, которые могут обеспечить значительное повышение ресурса данного оборудования, являются технологии управления структурой и свойствами поверхностных слоев материалов [1–5].

В настоящее время имеется широкий интерес к износостойким покрытиям, сформированным на базе таких металлов, как Ti, Cr, Ta, V и их химических соединений с углеродом и/или азотом. Основными преимуществами данных соединений являются высокая микротвердость (до 30000 МПа для TiC, 27000 МПа для VC, 30000 для CrN и т.д.), высокая жаростойкость, коррозионная стойкость, высокие трибологические свойства [1–6]. Данные свойства позволяют использовать покрытия на основе Ti, Cr, Ta, V и их химических соединений в качестве износостойких, коррозионно-стойких, антифрикционных покрытий, позволяющих многократно увеличить эксплуатационные свойства деталей оборудования, работающего в агрессивных условиях. Однако формирование подобных функциональных слоев на поверхности сталей сопряжено с определенными трудностями. Прежде всего, низкая совместимость подобных покрытий с материалом-основой при формировании их наплавкой методами PVD, CVD – наиболее распространенными на данный момент. Данная особенность затрудняет применение подобных покрытий при наличии ударных и знакопеременных нагрузок, а также при работе в коррозионно-активных средах. Кроме того, при высоких механических нагрузках наблюдается продавливание и скалывание покрытий ввиду слабой несущей способности материала-основы.

В связи с вышеописанными ограничениями из всего многообразия технологий стоит выделить разрабатываемую нами технологию комплексной химико-термической обработки (КХТО) [6–8].

КХТО включает три стадии, на 1-й стадии производится предварительная цементация, на 2-й стадии покрываемые изделия подвергаются диффузионному легированию в среде легкоплавких жидкометаллических растворов ДЛЛЖР, на 3-й стадии проводится термическая обработка, включающая поверхностную или объемную закалку и отпуск. Все стадии КХТО оказывают большое влияние на элементный, структурно-фазовый состав и свойства формирующихся диффузионно-легированных покрытий и позволяют создавать в поверхностных слоях покрываемых изделий покрытия, которые на поверхности имеют высокую твердость, т.е. высокие трибологические, коррозионные свойства и жаростойкость. Кроме того, под поверхностным (основным) слоем покрытия образуется твердый переходной слой покрытия с плавно изменяющейся концентрацией легирующих элементов, что обеспечивает постепенное снижение его твердости и высокую совместимость с материалом основы, это позволяет эксплуатировать изделия в условиях высокого механического воздействия, что значительно расширяет область применения защитных покрытий.

Технологические приёмы и режимы, применяемые на каждой из стадий КХТО, во многом определяют эксплуатационные свойства этих покрытий, что в конечном итоге дает широкую возможность путем варьирования ими получать покрытия с требуемыми для конкретных эксплуатационных условий свойствами.

Целью данной статьи является установление закономерностей влияния стадий КХТО на состав, физико-химические и механические свойства поверхностных слоев изделий, изготовленных из углеродистых и легированных конструкционных сталей.

Методика

Проводились экспериментальные исследования, включающие три основные стадии комплексной химико-термической обработки (КХТО): 1 стадия химико-термической обработки – предварительная цементация; 2 стадия – диффузионное легирование по технологии диффузионного легирования в среде легкоплавких жидкометаллических растворов (ДЛЛЖР); 3 стадия – закалка диффузионно-легированных поверхностных слоев сталей [9]. Экспериментальные исследования проводились на цилиндрических образцах диаметром 20 мм, высотой 30 мм, а также на 60 мм дисках, используемых для проведения трибологических исследований. Образцы изготавливались из углеродистых и легированных сталей: малоуглеродистых сталей Ст3, 20Х13; среднеуглеродистых сталей 40Х, 40Х13.

Первая стадия КХТО – предварительная цементация проводилась с использованием технологии вакуумной цементации. Цементация выполнялась при температуре 950 °С с выдержкой 8 часов.

На второй стадии КХТО подвергнутые цементации образцы подвергались диффузионному легированию по технологии (ДЛЛЖР), обеспечивающей формирование на их поверхностях диффузионно-легированных покрытий, то есть покрытия наносились путем их диффузионного легирования с применением разработанной нами технологии ДЛЛЖР, которая осуществляется путем погружения образцов в ванну с легкоплавким жидкометаллическим раствором, содержащим в растворенном состоянии легирующие элементы, в данном случае хром, на базе которых формируются покрытия, и выдержки в изотермическом режиме. Процесс проводился в инертной среде (аргоне).

Технология ДЛЛЖР основана на явлении изотермического, селективного переноса элементов покрытия, растворенных в легкоплавком расплаве, на поверхность изделия с последующим диффузионным взаимодействием элементов покрытия с основным материалом изделия [6–8].

Легирование хромом по технологии ДЛЛЖР проводилось в диапазоне температур от 950 до 1050 °С. Длительность выдержки варьировалась от 1 до 8 час.

Процесс проводился в технологической среде (транспортный расплав), представляющей собой эвтектический расплав свинец-висмут, в который в заданном количестве вводился хром. Процесс нанесения покрытия проводился в разработанной, запатентованной и изготовленной нами установке для ДЛЛЖР.

Для анализа полученных сведений о влиянии стадий КХТО на состав, физико-химические и механические свойства поверхностных слоев (покрытий), сформированных на углеродистых, легированных малоуглеродистых и среднеуглеродистых сталях, проводились:

- металлографические исследования на микрошлифах, подготовленных по стандартной методике;
- исследования по определению толщины покрытий, их структуры проводились на универсальном оптическом микроскопе NU-2E (Carl Zeiss Jena), а определение микротвердости – на микротвердомере Dura Scan Falcon 500;
- определение элементного состава покрытий производилось методом микрорентгено-спектрального анализа (МРСА) на сканирующем электронном микроскопе Tescan Lyra 3 с системой РСМА Oxford Ultim MAX.

Результаты и обсуждение

В ходе проведенных исследований было установлено, что каждая из стадий КХТО, включающей 1-ю стадию – предварительная цементация, 2-ю – проведение диффузионного легирования в среде легкоплавких жидкометаллических растворов ДЛЛЖР, 3-ю стадию термической обработки, включающую поверхностную или объемную закалку, отпуск, оказывает большое влияние на элементный, структурно-фазовый состав и свойства формирующихся диффузионно-легированных покрытий. Технологические приёмы и режимы, применяемые на каждой из этих стадий, во многом определяют эксплуатационные свойства этих покрытий, что в конечном итоге дает широкую возможность путем варьирования ими получать покрытия с требуемыми для конкретных эксплуатационных условий свойствами. При этом необходимо отметить, что стадиями, определяющими элементный, структурно-фазовый состав и свойства формирующихся покрытий, являются процессы, протекающие на первых двух стадиях, на которых происходят процессы диффузионного легирования, поэтому прежде всего проведем анализ процессов и закономерностей их протекания на этих стадиях.

Для конкретизации влияния каждой из первых двух стадий КХТО на формирование диффузионно-легированных покрытий рассмотрим процессы, протекающие на каждой из этих стадий.

1-я стадия – предварительная цементация. Целью 1-й стадии КХТО является создание в поверхностных слоях обрабатываемых изделий высокоуглеродистых слоев, исключающих обезуглероживание покрываемой стали в процессе КХТО и обеспечивающих на последующих стадиях КХТО формирование диффузионно-легированных хромосодержащих покрытий, обладающих заданными механическими и физико-химическими свойствами. Режимы этой стадии определяют концентрацию углерода и глубину его проникновения в поверхностные слои обрабатываемого стального изделия и оказывают большое влияние на элементный, структурно-фазовый состав и свойства формирующихся на 2-й стадии диффузионно-легированных хромосодержащих покрытий. Большое влияние режимов предварительной цементации объясняется тем, что вследствие того, что хром является сильным карбидообразующим элементом, элементный, структурно-фазовый состав, глубина и свойства диффузионно-легированного покрытия во многом определяются взаимодействием хрома с углеродом с образованием карбида хрома, которое, в свою очередь, определяется соотношением концентраций углерода и хрома.

Для обеспечения сохранения более чистой поверхности и активации процесса насыщения поверхностных слоев углеродом использовалась вакуумная цементация в пропанобутановой газовой среде при температуре 950 °С в течение 8 часов. Структура полученного цементованного слоя представлена на рис. 1.

2-я стадия КХТО включает проведение диффузионного легирования в среде легкоплавких жидкометаллических растворов по технологии ДЛЛЖР. Как уже отмечалось в разделе «методика», подвергнутые цементации образцы проходят диффузионное легирование в среде легкоплавкого жидкометаллического раствора, представляющего собой эвтектический расплав свинец-висмут, в котором растворен хром, являющийся элементом –диффузантом, формирующим диффузионно-легированное хромосодержащее покрытие (рис. 2).

Как показали проведенные исследования, формирующиеся в процессе ДЛЛЖР диффузионно-легированные покрытия на базе хрома, их толщина, элементный, структурно-

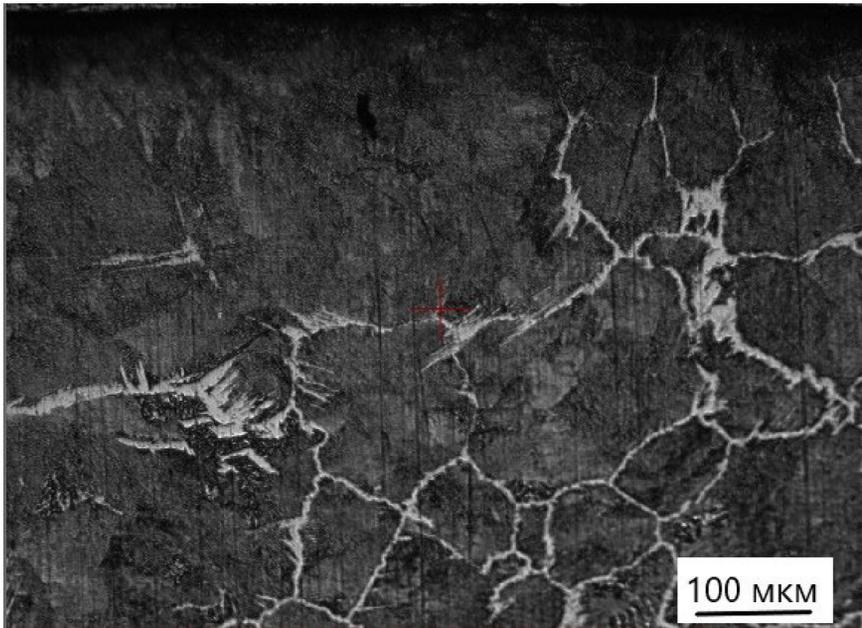
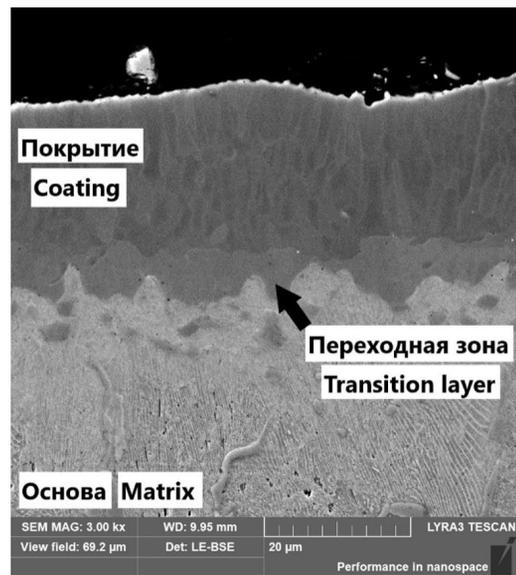


Рис. 1. Структура цементованного слоя

Fig. 1. Carburized layer structure



а)



б)

Рис. 2. Микроструктуры покрытий, сформированных на углеродистых сталях: а – Ст3; б – 40X

Fig. 2. Coatings microstructures formed on carbon steels: а – St3; б – 40X

фазовый состав и свойства после предварительной цементации значительно отличаются по этим параметрам от диффузионно-легированных покрытий, формирующихся без проведения предварительной цементации. При этом после проведения процесса ДЛЛЖР с предварительной цементацией и без неё покрытия формируются многослойными, имеющими основную и переходную зоны, однако толщина, элементный, структурно-фазовый состав, концентрационное распределение легирующих элементов в формирующихся покрытиях различны. Так, например, толщина покрытия после процесса цементации и ДЛЛЖР составляет 46 мкм, а без цементации на этой же стали – 8 мкм.

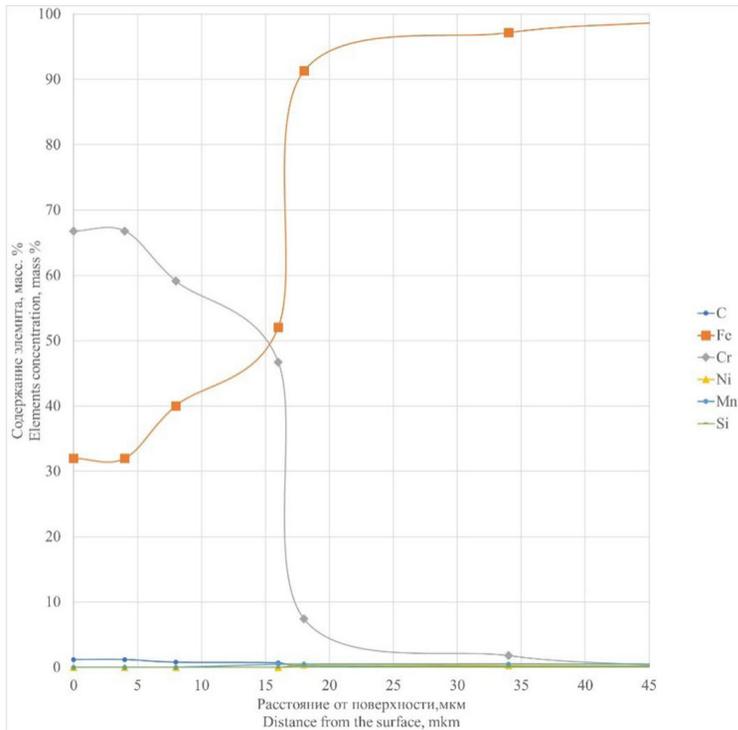
Как показали результаты микрорентгеноспектрального анализа, представленные на рис. 3, элементный, структурно-фазовый состав и толщина формирующихся покрытий, полученных после последовательно проведенных предварительной цементации и ДЛЛЖР, при одинаковых технологических режимах зависят от состава покрываемой стали. Так, после проведения этих обработок на поверхности образцов из стали Ст3 концентрация хрома составляет 68,8 %, углерода – 1,2 %, в то время как на стали 40X на поверхности концентрация хрома и углерода снижается до 64,22 % и 0,8 % соответственно. На поверхности легированных сталей: стали 20X13 содержание хрома составляет 62,54 %, а углерода – 0,8 %; стали 40X13 на поверхности содержание хрома составляет 64,22 %.

Кроме того, необходимо отметить, что при одинаковых режимах технологий цементации и ДЛЛЖР толщина формирующихся покрытий, их элементный и структурно-фазовый состав также определяются составом покрываемой стали. Так, толщина сформированных покрытий, определяемая до концентраций, соответствующих концентрации материала основы, составила: на сталь Ст3–46 мкм; 40X – 21 мкм; 4 20X13–18 мкм; стали 40X13–18 мкм. Как видно из представленных результатов, наибольшая толщина покрытия наблюдается при формировании покрытий на малоуглеродистой и нелегированной стали Ст3.

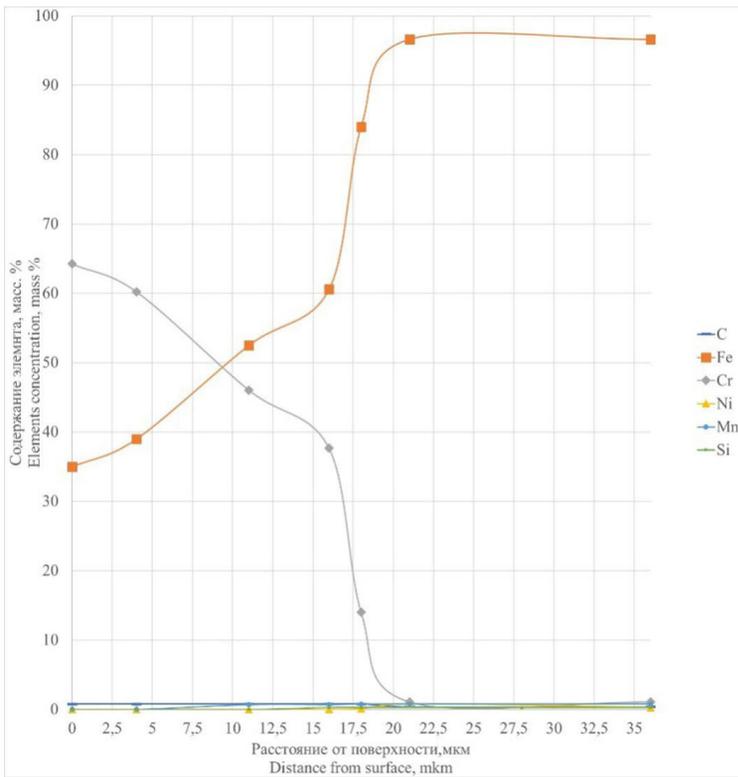
Также анализ (рис. 3) показывает, что по глубине в покрытии наблюдаются две основные зоны – поверхностная зона, имеющая повышенное содержание хрома и углерода, и переходная зона, характеризующаяся плавным снижением концентрации хрома и углерода до концентраций этих элементов, соответствующих их концентрации в материале основы. Также необходимо отметить, что концентрации хрома и углерода, а также характер их распределения в этих зонах, при одинаковых режимах процессов цементации и ДЛЛЖР определяются составом покрываемой стали. Так, при формировании покрытий на базе хрома в поверхностных слоях малоуглеродистой стали Ст3 в поверхностной зоне на расстоянии от поверхности 4 мкм наблюдается слой с одинаковой концентрацией хрома 66,8 % и углерода 1,2 %. На расстоянии от поверхности 18 мкм наблюдается резкое падение концентрации хрома до 59,14 % и углерода до 0,8 %. Далее в покрытии появляется переходная зона протяженностью 28 мкм, характеризующаяся плавным снижением концентраций хрома и углерода до концентраций, соответствующих стали Ст3.

На стали 40X в поверхностной и переходной зонах наблюдается плавное снижение концентрации хрома при постоянной концентрации углерода 0,8 %.

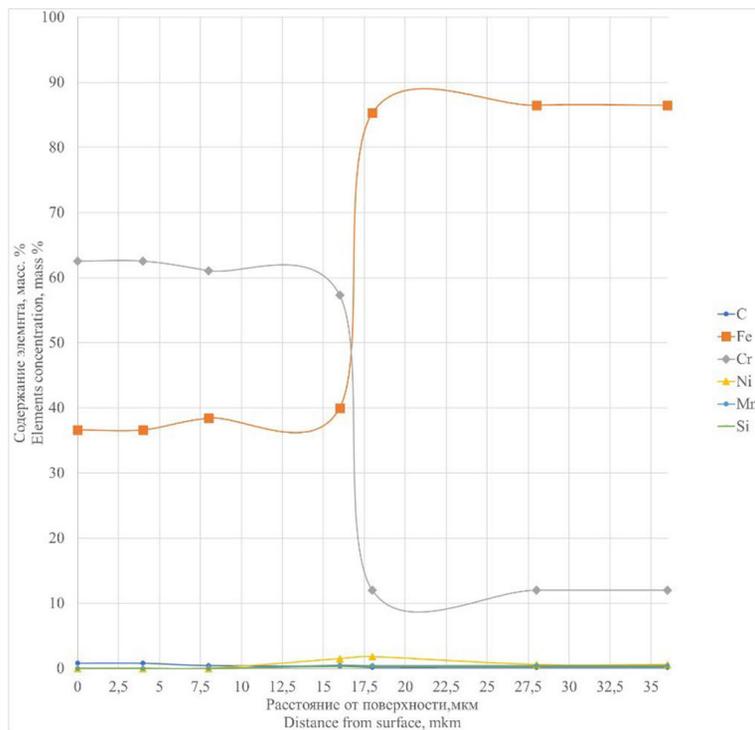
При формировании покрытий на стали 20X13 концентрация хрома в поверхностной зоне остается практически постоянной (более 60 %), толщина этой зоны достигает 15 мкм. В то же время при поверхностном легировании концентрация хрома более 60 % у стали Ст3 не превы-



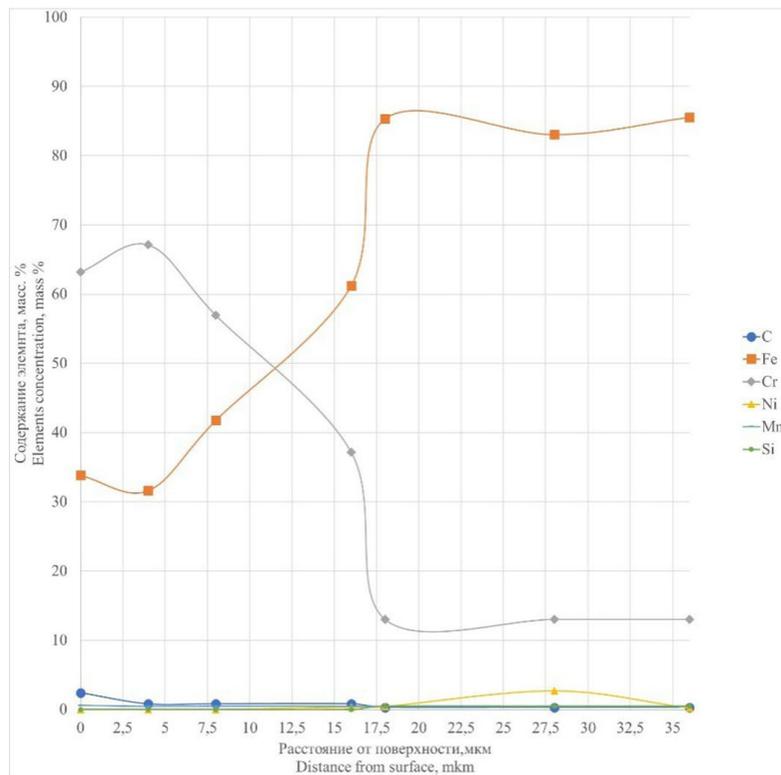
а)



б)



Б)



Г)

Рис. 3. Распределение элементов после КХТО: а) Ст3; б) 40Х; в) 20Х13; г) 40Х13

Fig. 3. Elements distribution after CTT: а) St3; б) 40X; в) 20X13; г) 40X13

шает глубину 4 мкм, стали 40Х – 5 мкм, стали 40Х13–7 мкм. Данные явления, происходящие при формировании диффузионно-легированных хромовых покрытий на сталях, содержащих карбидообразующие элементы, каким является хром, объясняются образованием в поверхностных зонах карбидов на базе хрома, диффундирующего из технологической среды.

Кроме перечисленного анализ проведенных исследований по изучению влияния режимов технологии ДЛЛЖР на кинетику формирования диффузионно-легированных покрытий показывает, что толщина диффузионно-легированных покрытий, так же как элементный и структурно-фазовый состав, зависит от состава покрываемых сталей, температуры и длительности их выдержки в легкоплавком жидкометаллическом растворе – технологической среде. Результаты этих исследований представлены на рис. 4.

Как следует из анализа графиков, влияние технологических режимов и состава покрываемой стали на толщину формирующихся диффузионно-легированных покрытий (рис. 4а), наибольшая скорость их формирования наблюдаются на малоуглеродистой стали Ст3. Повышение содержания углерода и легирующих элементов в покрываемых сталях приводит к снижению скорости роста покрытий, что можно объяснить снижением диффузионной подвижности хрома вследствие блокирования её углеродом и наличием хрома в покрываемых сталях.

Большое влияние на толщину диффузионно-легированных слоев оказывает длительность протекания стадии процесса выдержки покрываемых изделий в технологической среде. Кривые зависимости толщины легированного слоя (рис. 4б) определяются длительностью протекания данного процесса и имеют параболический характер. В начальный период времени наблюдается интенсивный рост толщины покрытия, затем скорость роста толщины покрытий снижается, и при выдержке более 8 часов рост толщины покрытий значительно уменьшается.

Кроме того, необходимо отметить, что кроме кинетики формирования покрытий режимы технологии ДЛЛЖР оказывают значительное влияние на концентрационное распределение элементов в этом покрытии, особенно температура процесса. Закономерность влияния темпе-

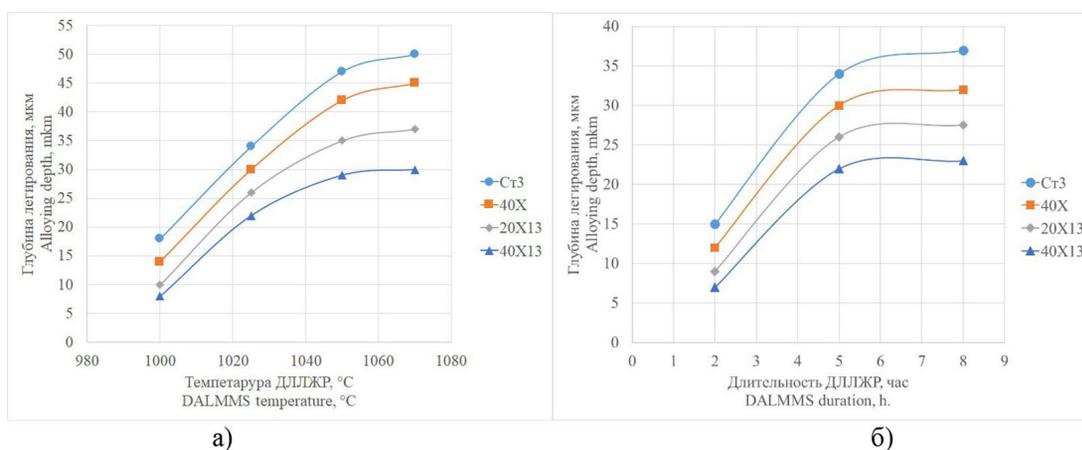


Рис. 4. Влияние технологических режимов и состава покрываемой стали на толщину покрытий: а) влияние температуры и состава стали; б) влияние времени выдержки и состава стали

Fig. 4. Technological modes and steel composition influence to coatings thickness: a) influence of temperature and steel composition; б) influence of exposure time and steel composition

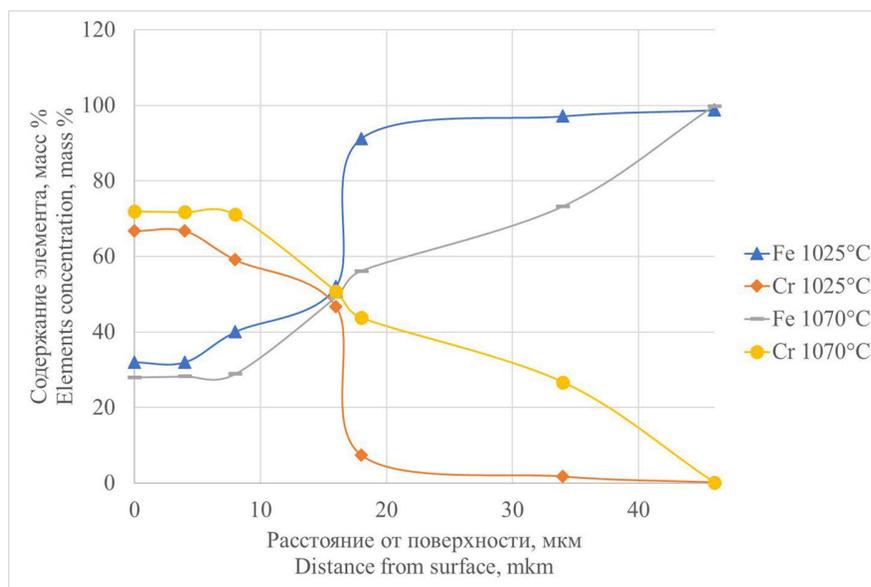


Рис. 5. Влияние температуры процесса диффузионного легирования на концентрационное распределение элементов в покрытии, сталь Ст3

Fig. 5. Influence of the DALMMS temperature to the concentration distribution of elements in the coating, steel St3

ратуры процесса ДЛЛЖР на концентрационное распределение элементов в покрытии рассмотрим на примере стали Ст3 (рис. 5).

Анализ концентрационного распределения Cr по глубине покрытия показал, что температура процесса ДЛЛЖР значительно влияет на концентрационное распределение Cr по покрытию. Так, прежде всего температура процесса влияет на концентрацию Cr на поверхности покрытия. При температуре процесса 1070 °С концентрация Cr составила 72 %, в то время как при температуре 1025 °С концентрация Cr равняется 66,8 %.

Кроме того, протяженность зоны, в которой концентрация Cr остается постоянной при температуре 1070 °С, составляет 8 мкм, а при температуре 1025 °С – 4 мкм, т.е. протяженность зон с повышенным содержанием Cr отличается в 2 раза.

Температура процесса также оказывает влияние на концентрационное распределение Cr в переходной зоне покрытия. Как следует из анализа концентрационного распределения Cr в переходной зоне, при температуре 1070 °С наблюдается плавное уменьшение концентрации Cr до глубины покрытия, равной 46 мкм, а при температуре 1025 °С концентрация Cr резко снижается на глубине 16 мкм.

При этом необходимо отметить, что полная толщина покрытий, определяемая глубиной, на которой содержание элементов соответствует составу покрываемой стали, при температурах 1070 и 1025 °С одинакова и составляет для стали Ст3 46 мкм.

Выводы

1. Установлено, что первые две стадии КХТО – предварительная цементация и диффузионное легирование в среде легкоплавких жидкометаллических растворов (ДЛЛЖР) опре-

деляют элементный, структурно-фазовый состав и свойства формирующихся покрытий. При этом 1-я стадия – предварительная цементация – обеспечивает создание на поверхности покрываемых изделий высокоуглеродистых слоев, исключая обезуглероживание покрываемой стали на 2-й стадии в процессе КХТО, и способствует формированию на этой стадии диффузионно-легированных хромосодержащих покрытий, обладающих заданными механическими и физико-химическими свойствами.

2. Формирующиеся в процессе ДЛЛЖР диффузионно-легированные покрытия на базе хрома, их толщина, элементный, структурно-фазовый состав и свойства после предварительной цементации значительно отличаются по этим параметрам от диффузионно-легированных покрытий, формирующихся без проведения предварительной цементации. Покрытия формируются многослойными, имеют основную зону и протяженную переходную зону.

3. Элементный, структурно-фазовый состав и толщина формирующихся покрытий, полученных после последовательно проведенных предварительной цементации и ДЛЛЖР, зависят от состава покрываемых сталей, режимов ДЛЛЖР – температуры и длительности процесса. Повышение температуры и длительности процесса ДЛЛЖР приводит к росту толщины покрытий и к повышению концентрации Сг в этих покрытиях.

4. Наибольшая скорость формирования диффузионно-легированных покрытий наблюдается на малоуглеродистой стали Ст3. Повышение содержания углерода и легирующих элементов в покрываемых сталях приводит к снижению скорости роста покрытий, что объясняется снижением диффузионной подвижности хрома вследствие блокирования её углеродом и наличием хрома в покрываемых сталях.

Список литературы / References

- [1] Hai Zhao, Yi Ding, Jinghui Li, Gao Wei, Mingya Zhang. Corrosion resistance of laser melting deposited Cu-bearing 316L stainless steel coating in 0.5 M H₂SO₄ solution. *Materials Chemistry and Physics*. 291. 2022. 126572. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126572>.
- [2] Hong-Qiang Fan, Peng Lu, Xuan Zhu, Yashar Behnamian, Qian Li. Development of superhydrophobic and corrosion resistant coatings on carbon steel by hydrothermal treatment and fluoroalkyl silane self-assembly. *Materials Chemistry and Physics*. 290. 2022. 126569. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126569>.
- [3] Xiang Hou, Hao Wang, Qun Yang, Yanxia Chen, Linjiang Chai, Bo Song, Ning Guo, Shengfeng Guo, Zhongwen Yao. Microstructure and properties of Cr-AlN composite coating prepared by pack-cementation on the surface of Al-containing ODS steel. *Surface and Coatings Technology*. 447. 2022. 128842. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128842>.
- [4] Vikrant Singh, Anil Kumar Singla, Anuj Bansal. Impact of HVOF sprayed Vanadium Carbide (VC) based novel coatings on slurry erosion behaviour of hydro-machinery SS 316 steel. *Tribology International*. 176. 2022. 107874. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107874>.
- [5] Kang Yang, Cheng Chen, Guozheng Xu, Zitao Jiang, Shihong Zhang, Xia Liu. HVOF sprayed Ni–Mo coatings improved by annealing treatment: microstructure characterization, corrosion resistance to HCl and corrosion mechanisms. *Journal of Materials Research and Technology*. 19. 2022. 1906–1921. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.05.181>.

[6] Sokolov A.G., Bobylyov E.E., Plomod'ialo R.L. Influence of carburization on the structure and properties of functional diffusion coatings based on titanium carbide on TiC-WC-Co and WC-Co alloys. *Lett. Mater.*, 2020, 10(4) 410–415

[7] Sokolov A.G., Bobylev E.E., Storozhenko I.D. Formation of diffusion coatings based on nickel and chromium in the medium of fusible liquid metal solutions on austenitic steels. *Solid state phenomena*. 2021. 316. 851–856.

[8] Sokolov A.G., Bobylyov E.E. Increase of durability of austenitic steel by overlap of carburization and diffusion saturation from liquid metal medium solutions technologies. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol.* 2020. 13(4). 502–511. DOI: 10.17516/1999–494X-0241

[9] Пат. № 2679318 МПК C23C 2/10, C23C 11/02 (2006.01) Способ диффузионного насыщения изделий из аустенитных сталей получения износостойкого покрытия на поверхности сталей. А. Г. Соколов РФ, Э. Э. Бобылев РФ, Р. А. Попов – заявлено 21.03.2018 г. опуб.07.02.19, Бюл. № 4. [№ 2679318 Sokolov A. G., Bobylyov E. E., Popov R. A. Method of diffusion saturation of products made of austenitic steels obtaining a wear resistant coating on the surface of steels (Moscow: Rospatent)]